

中文引用格式:房明,张毅,谭玥. 多因素耦合失效模式下地铁施工安全系统与管理模型[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(5): 82-90.

英文引用格式:FANG Ming, ZHANG Yi, TAN Yue. Safety system and management model of subway construction under multi-factor coupling failure mode[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(5): 82-90.

多因素耦合失效模式下地铁施工安全系统 与管理模型*

房明¹副教授, 张毅²高级工程师, 谭玥³工程师

(1 广东财经大学 公共管理学院, 广东 广州 510320; 2 广东省建筑设计研究院有限公司
勘测设计研究所, 广东 广州 510010; 3 中国铁路济南局集团有限公司, 山东 济南 250001)

中图分类号: X948 文献标志码: A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.05.1093

基金项目: 教育部人文社科研究项目青年基金资助(19YJCZH279); 广东省基础与应用基础研究基金资助(2019A1515010502, 2021A1515011499)。

【摘要】 为提升地铁施工安全管理效果, 减小地铁坍塌事故的发生, 分析地铁施工事故风险因素。首先, 分析事故致因中人群-机群的多因素耦合模式; 然后, 借助事故致因“2-4”模型(24Model)和广义安全模型(GSM), 构建地铁施工安全系统管理模型; 最后, 将人群-机群系统多因素耦合失效模式应用于已有的16起地铁施工坍塌事故, 统计得到14个人群与6个机群致因因素, 分别给出其多因素耦合模式及作用路径, 并计算风险等级。结果表明: 地铁施工人群-机群的多因素耦合效应包含6种模式和14条作用路径。地铁施工安全系统管理模型分为目标层与匹配层, 其中, 匹配层主要是将事故原因与安全防线相匹配, 包括微匹配、中匹配和宏匹配3个层面。并基于地铁施工安全系统管理模型, 给出地铁坍塌事故预防安全管理“三道防线”。

【关键词】 多因素耦合; 失效模式; 地铁施工; 安全系统; 坍塌事故; “2-4”模型(24Model); 广义安全模型(GSM)

Safety system and management model of subway construction under multi-factor coupling failure mode

FANG Ming¹, ZHANG Yi², TAN Yue³

(1 School of Public Administration, Guangdong University of Finance & Economics, Guangzhou Guangdong 510320, China; 2 Institute of Survey and Design, Architectural Design and Research Institute of Guangdong Province, Guangzhou Guangdong 510010, China; 3 China Railway Jinan Group Co., Ltd., Ji'nan Shandong 250001, China)

Abstract: In order to improve the safety management effect of subway construction and reduce the occurrence of subway collapse accidents, the risk factors of subway construction accidents were analyzed. Firstly, the multi-factor coupling mode of 'human' and 'object' in accident causation were analyzed systematically. On this basis, with the help of accident causation 24Model and GSM, the management model of safety system was constructed. Finally, the multi-factor coupling failure mode of human-object

system was applied to 16 existing subway construction collapse accidents. The multi-factor coupling mode and action path of 14 "human" reasons and 6 "object" reasons were given respectively, and their risk levels were calculated. The results show that there are 6 modes and 14 action paths for the multi-factors coupling effect of "human" and "object" in subway construction. The management model is divided into the target layer and the matching layer between the cause of the accident and the safety defense line. The matching layer is constructed from three levels: micro matching, medium matching and macro matching. Based on the established safety system management model of subway construction, the "three defense lines" of subway collapse accident safety construction management were given.

Keywords: multi-factor coupling; failure mode; subway construction; safety system; collapse accident; "2-4" model (24Model); generalized security model (GSM)

0 引言

城市轨道交通工程本身的特殊施工工法和作业环境导致生产安全事故频发,成为实现其建设目标的关键障碍。2011—2020年,我国(不包括港澳台地区)31个省市自治区地铁施工事故共计182起^[1],其中,地铁施工坍塌事故为主要事故类型。因此,开展地铁施工安全系统失效模式分析及构建安全管理模型,既可以丰富事故致因理论,又可以满足现实需要。

地铁施工事故发生的本质是多种风险因素交互耦合作用的结果^[2],这些因素分别为人为风险、机械风险、环境风险和管理风险^[3]。这一耦合效应具有随机性、突发性、不可逆性和系统性^[4]。因此,以系统安全为切入点,将这4种风险因素划分为人群和机群2大类^[5],从而构建基于人群-机群的地铁施工系统。其中,人群因素包括人为风险和管理风险;机群因素包括机械风险和環境风险。轨迹交叉理论指出预防事故的根本在于避免人群失误和机群故障同时空出现^[6]。因此,主要探讨以下问题:①基于人群-机群的地铁施工系统中多因素风险耦合模式及相互作用路径有哪些?②基于多因素耦合模式,结合现有的成熟事故致因模型,能否提出针对地铁施工安全的管理模型?

目前,不少学者分别基于中间构建、逆向构建及正向构建3类范式建立安全管理模型,深入研究地铁施工事故致因机制。①基于中间构建范式构建的安全模型,以风险控制与管理为主线,从尚未形成事故的隐患出发。例如:基于模糊理论的风险分析方法虽能够有效进行地铁施工过程中的风险分析与管理^[7-9],但现有的地铁坍塌事故模糊风险评价研究中,基于专家调查法所获得的数据因未能进行有效处理,其可靠性往往难以保证。再如,基于概率风险

分析研究基础上发展的各种风险评价方法,如故障树分析法、事件树分析法、风险矩阵法、蒙特卡罗法、贝叶斯网络等,在地铁安全风险方面发挥了重要作用^[10-13]。然而,由于运用概率方法进行定量分析,其结果的可靠性严重依赖于输入风险数据的有效性和准确性,而实际地铁工程中由于风险的高度不确定性导致满足概率方法建模的统计数据很难获取。②基于逆向构建范式构建的安全模型,以事故预防为主线,并以事故为切入点,这类模型大多基于事故致因理论而提出,例如:人因分析与分类系统^[14]、系统理论事故建模与过程模型^[15-16]等。在众多事故致因理论及模型中,"2-4"模型(24Model)因其具有静态(线性)和动态(非线性)2种形式,所以具备了整体性、关联性、层次性、动态性等系统性特征^[17],在分析像地铁施工这类风险因素不确定性较大的事故方面,相较于其他事故致因理论与模型更具有优势。但是,已有的基于24Model的地铁施工安全事故致因研究^[18]认为,不安全状态主要来自于人群的不安全行为,或来自于习惯性行为,而忽略机群的不安全状态和人群的不安全行为的共同作用,因此,在分析地铁施工不安全行为和不安全物态之间的交互耦合作用方面稍显不足。③针对这一不足,广义安全模型(Generalized Safety Model, GSM)恰好可以予以弥补,该方法基于安全科学和大安全观的视角,以系统安全为基点,提出安全模型的正向构建范式,并构建GSM。该模型的最大特点是可以表征人群-机群的相互作用关系,善于分析事故原因之间的耦合效应^[5]。

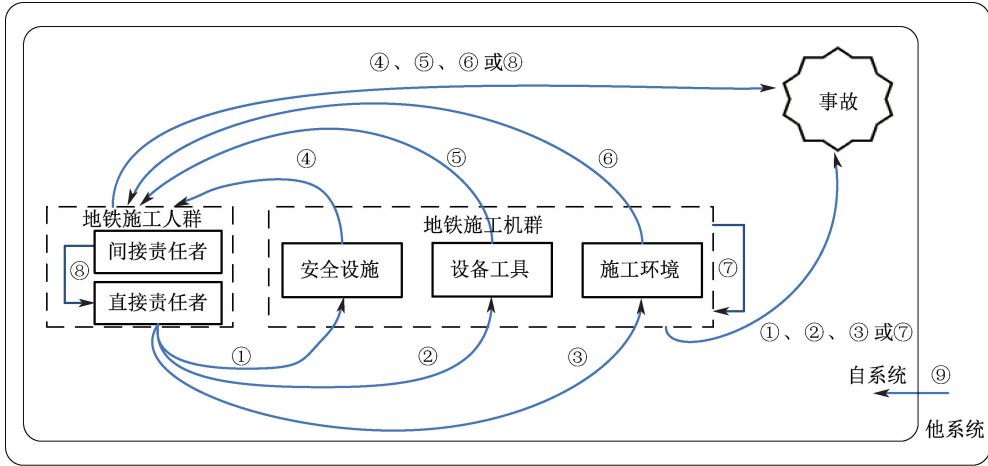
鉴于此,笔者拟提出一种新的地铁施工多因素风险耦合失效模式;统计分析已有的16起地铁坍塌事故,提炼人群、机群风险因素,揭示其耦合路径,并计算风险等级;在此基础上,结合24Model和GSM构建地铁施工安全系统管理模型,给出预防地铁坍塌

塌事故安全管理的“三道防线”,以期提升地铁施工安全管理效果和减小地铁坍塌事故的发生。

1 地铁施工多因素耦合失效模式

24 Model 和 GSM 均认为,人群因素是指直接责

任者和间接责任者的不安全行为(Unsafe Actions, UA);机群因素为安全设施、设备工具和施工环境的不安全状态(Unsafe Conditions, UC)。那么,地铁施工自系统的安全状况将受到自系统中人群、机群及他系统致因因素的影响,如图1所示。



注:圈数字代表耦合作用路径编号。

图1 地铁施工系统多因素耦合失效模式

Fig.1 Multi-factor coupling failure mode of subway construction system

地铁施工事故致因模式存在4种情况:

1) 机群受人群的影响导致事故发生(UA→UC)。由于机群的不安全状态均与直接责任者的不安全动作或状态、间接责任者的管理失误有关,因此,机群的不安全状态背后隐藏着人群的不安全行为。如人为操作不当(UA)导致的机械设备损坏(UC)等。

2) 人群受机群的影响导致事故发生(UC→UA)。这也是地铁事故区别于其他建设施工事故的特殊性^[19]。根据我国2003—2017年247起地铁施工事故的统计,坍塌事故主要发生在3—5月和11月^[20]。主要原因是3—5月是华南和长江中下游地区的雨季,11月以后长江中下游地区的阴雨天气持续时间较长。长期降雨使事故现场土体松散(UC),若未采取有效技术和管理措施及时消除事故隐患(UA),易造成地面塌陷事故,这属于UC→UA致因模式。以上结论表明:UC引发UA是地铁施工坍塌事故的主要原因之一。其中,UC既指复杂水文地质条件(如富水地层),亦指复杂周边环境(如存在地上建筑、地下管线等)。

3) 人群的不安全行为和机群的不安全状态各自影响导致事故,具体体现在UC→UC、UA→UA这2种耦合失效模式上。其中,在UA→UA模式中,前

一个UA一般来自间接责任者,后一个UA来自直接责任者,图1中作用路径⑧。

4) 自系统受他系统的影响导致事故的发生(他系统→自系统)。因地铁施工这类环境风险存在于勘察设计及施工阶段,其中,勘察设计阶段的隐含风险往往在施工阶段才能显现出来^[21],因此,系统内不仅包括施工单位自系统,也包括勘察设计单位等相关责任单位他系统。

为便于理解,结合图1,将多因素耦合失效模式具体归纳为15条路径,见表1。其中,UC→UC、UA→UA、UC→UA、UA→UC为地铁施工多因素耦合失效的4种基本模式,对应8条作用路径。此外,4种基本模式可以两两叠加产生影响,导致事故发生。如UC→UA→UA和UA→UA→UC,相应的共有6条路径。例如:广州地铁11号线“12·1”较大坍塌事故中,由于坍塌位置的地面原为城市主干道(UC),导致无法在路面上进行地质勘察,进而无法探明地下溶洞的存在,即事故发生前存在地质勘探精度低(UA)的风险隐患。而地质勘测精度较低(UA),又可能导致所采用的施工方案不合理(UA)。即存在UC→UA→UA的叠加模式。并且这些勘察、设计阶段的隐含风险往往在施工阶段才能显现出来。

表 1 地铁施工多因素耦合失效模式与作用路径

Table 1 Multi-factor coupling failure mode and action path of subway construction

序号	耦合模式	事故致因路线	作用路径
1	UC→UC	UC→UC→事故	⑦→事故
2	UA→UA	UA→UA→事故	⑧→事故
3	UC→UA	UC→UA→事故	④→事故
			⑤→事故
			⑥→事故
4	UA→UC	UA→UC→事故	①→事故
			②→事故
			③→事故
5	UC→UA→UA	UC→UA→UA→事故	④→⑧→事故
			⑤→⑧→事故
			⑥→⑧→事故
6	UA→UA→UC	UA→UA→UC→事故	⑧→①→事故
			⑧→②→事故
			⑧→③→事故
7	他系统→自系统	他系统→自系统→事故	⑨→事故

2 地铁施工安全管理模型构建

无论组织内的人群-机群如何相互作用,最终导致事故发生的作用点是人,即事故的直接责任者,可见:保障人群安全、健康、舒适、高效地工作对地铁

施工安全事故管理的重要性。因此,将以事故为着眼点,构建的 24Model 与以安全为着眼点构建的 GSM 相匹配,从而构建地铁施工事故预防管理模型,如图 2 所示。

该模型的第 1 层为目标层,即实现人群的安全、

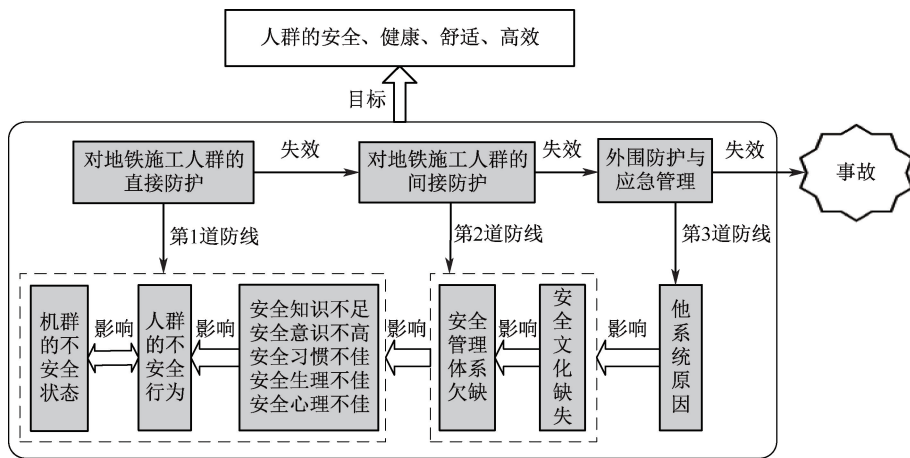


图 2 事故预防管理模型

Fig. 2 Accident prevention management model

健康、舒适、高效地工作。第 2 层为事故原因与安全防线的匹配层,可分别从微匹配、中匹配和宏匹配 3 个层面进行分析。

1) 微匹配层面。即个人层面的原因与对人群的直接防护相匹配。人群的不安全行为和机群的不安全状态属于个人层面的直接原因。而个人层面直接原因是由深层次原因所导致,这些深层次原因主要包括:安全知识不足,安全意识不高,安全习惯、生理、心理不佳等。与个人层面原因相匹配的是

对人群的直接防护措施,是第 1 道防线。通过安全教育等措施对人群的安全技能、安全行为产生正向影响。

2) 中匹配层面。即自系统层面的原因与对人群的间接防护相匹配。从中观层面上来看,致因因素主要包括安全管理体系欠缺和安全文化缺失等,这些因素均属于自系统层面的原因,与之匹配的是对人群的间接防护措施,是第 2 道防线。

3) 宏匹配层面。即他系统原因与外围防护和

应急相匹配。从宏观层面来看,地铁施工安全事故致因因素还包括他系统原因,与之匹配的是外围防护与应急措施,是第3道防线。通过对危险源的隔离或在紧急情况发生时启动应急管理方案,从而控

制事故,保护人群。

在地铁施工安全事故致因模式和事故预防管理模型分析的基础上,进一步构建地铁施工安全管理模型,如图3所示。

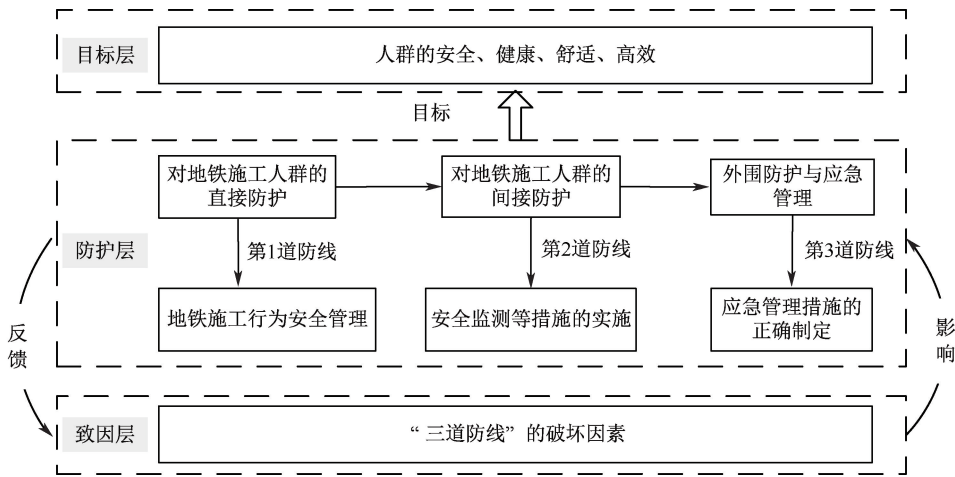


图3 地铁施工安全管理模型

Fig. 3 Safety management model of subway construction

该模型分为3层,第1层为目标层;第2层为防护层,主要由地铁施工安全管理的“三道防线”构成;第3层为致因层。其具体内涵如下:

1) 对于3道防线,只要第1道防线正确执行与实施,就能保证目标层的实现,若第1道防线出现错误或失误,其他2道防线将进行弥补,从而增加施工现场人群及社会公众受到危害的风险。

2) 对地铁施工安全系统来说,第1道防线中,安全管理人员通过安全教育管理施工现场人群的行为安全;通过安全监测等措施,明确当前的安全状况,安全管理人员采取针对性的安全应对措施。第2道防线中,地铁施工安全管理部门通过完善安全管理体系,建立安全文化,实现对人群的间接防护。第3道防线中,由自系统中安全管理人员、他系统中政府、其他相关单位和社会公众共同参与,根据现场实际情况,实施相应的应急措施,以控制事故产生的

危害。

3) 在该安全管理模式下,地铁施工中人群-机群中多因素耦合作用对该安全系统产生影响。“三道防线”依次对事故隐患的控制和消除发挥作用,从而形成一个多重保护且具有目标性、实践性、动态性的系统安全管理模式。在该安全管理模式下的地铁施工安全管理将处于消除、控制事故隐患的状态。

3 地铁施工安全管理模型的应用

3.1 地铁施工人群-机群耦合失效模式分析

统计2003—2021年16起地铁施工坍塌事故,见表2。从统计结果可以发现,有2类不安全行为是直接责任者发出的;有9类不安全行为为间接责任者发出;另外,还有3类不安全行为是由直接责任者和间接责任者共同发出产生的。这里的间接责任者,主要指建设、施工、监理单位项目管理人员。

表2 人群的不安全行为分类与统计

Table 2 Classification and statistics of human unsafe actions

序号	人群的不安全行为	不安全行为发出者	人群-机群耦合模式	耦合模式作用路径
UA1	监理单位未能严格履行监理职责,未按规定开展监理工作;监理人员资格不符合国家规定要求	间接责任者	—	—
UA2	安全生产责任人未完全履职;现场管理人员资格不符合要求	间接责任者	—	—
UA3	工人违章作业	直接责任者	—	—
UA4	未按施工设计图要求或施工方案施工	直接责任者 间接责任者	UA→UA→事故	⑧→事故

续表 2

序号	人群的不安全行为	不安全行为发出者	人群-机群耦合模式	耦合模式作用路径
UA5	风险评估不到位	直接责任者	UA→UA→事故	⑧→事故
		间接责任者	UC→UA→事故	⑥→事故
UA6	施工单位制定的施工方案和施工技术交底针对性不强	间接责任者	UA→UA→事故	⑧→事故
UA7	技术交底和安全培训不到位或内容设置欠缺;未制定合理的人员培训计划	间接责任者	UA→UA→事故	⑧→事故
UA8	施工单位安全生产管理人员未消除安全隐患(险情征兆出现、没有及时采取有效措施,排除险情)	间接责任者	UA→UA→事故	⑧→事故
			UC→UA→UA→事故	⑥→⑧→事故
UA9	设备使用不当	直接责任者	UC→UA→事故	⑤→事故
UA10	缺乏安全与应急防护装备;施工单位缺乏有效的应急联动机制	间接责任者	UA→UA→事故	⑧→事故
			UC→UA→事故	④→事故
UA11	设备维护、维修不及时	直接责任者 间接责任者	UC→UA→事故	⑤→事故
UA12	未对分包单位安全生产工作统一协调、管理	间接责任者	—	—
UA13	违法分包工程、分包单位违法承包工程	间接责任者	—	—
UA14	现场管理人员违章指挥施工	间接责任者	UA→UA→事故	⑧→事故

由于表2统计的事故直接原因是人群的不安全行为,因此,多因素耦合主要集中在“UA→UA→事故”“UC→UA→事故”与“UC→UA→UA→事故”3种失效模式上,对应的作用路径为⑧→事故、④→事故、⑤→事故、⑥→事故与⑥→⑧→事故。其中,占比最多的是耦合失效模式为“UA→UA→事故”,其路径为“间接责任者→直接责任者→事故”。表明事故的不安全行为不仅是指直接责任者的不安全动作,还包括不规范的管理。即间接责任者的不安全行为是造成地铁施工事故的主要原因。对于间接责任者,一方面要履行相应职责避免违章指挥,另一方面,间接责任者是造成事故直接责

任者的安全知识、意识和习惯缺乏的相关责任人。而直接责任者的不安全行为更多涉及到工人违章作业、设备使用不当等,分别属于违章行动和违章操作。因此,如何提升直接责任者的安全知识、意识和习惯是构建“第一道防线”的关键和重要目标。

机群的不安全状态分类与统计见表3。从表3可以看出,有4个不安全物态为施工环境,而安全设施和设备工具各占1个。这里的施工环境包括自然环境和人为环境。自然环境主要是指施工位置周边的水文与工程地质、降雨等;人为环境主要包括周边的既有隧道、管线及建筑物基础等。

表3 机群的不安全状态分类与统计

Table 3 Classification and statistics of unsafe conditions

序号	机群的不安全状态	类别	人群-机群耦合模式	作用路径
UC1	存在复杂地层	施工环境	UA→UC→事故	③→事故
UC2	降雨	施工环境	UA→UC→事故	③→事故
UC3	未设置支撑防护或存在严重缺陷	安全设施	UA→UC→事故	①→事故
UC4	水文地质条件复杂,施工中先后出现渗水、溶洞风险征兆	施工环境	UA→UC→事故	③→事故
UC5	喷浆机、冷冻机等机械设备故障或维修不及时	设备工具	UA→UC→事故	②→事故
UC6	存在地下管线	施工环境	UA→UC→事故	③→事故

由于表3统计的事故直接原因是机群的不安全状态,因此,人群-机群耦合主要集中在“UA→UC→事故”模式上,对应的作用路径为①→事故、②→事故与③→事故。从16起事故的统计结果

可以看出,机群的不安全状态的前因都在人群,因此,“UA→UC→事故”模式所对应的作用路径为“直接责任者(或间接责任者)→机群的不安全状态→事故”。

3.2 地铁施工人群-机群风险等级判定

风险是指危险源发生的概率 P 与后果 C 的结合,可用风险度 R_i 定量衡量^[22],即:

$$R_i = P_i \cdot C_i \quad (1)$$

$$P_i = N_i / N \quad (2)$$

$$C_i = C_{Di} / Q \quad (3)$$

式中: P_i 为第 i 个不安全行为或物态发生的可能性; C_i 为第 i 个不安全行为或物态产生的后果; N_i 为第 i 个不安全行为或物态发生的频数; N 为所有不安全行为或物态发生的总次数; C_{Di} 为第 i 个不安全行为或物态引发事故的死亡人数; Q 为统计事故的总数量。不安全行为风险等级判定,可根据 R 的取值范围分别评定为重大风险(I级)、较大风险(II级)、一

般风险(III级)和低风险(IV级)^[23]。

据统计,16起地铁施工坍塌事故中共计14个不安全行为,见表4。发生总次数为69次,占比较多的5个不安全行为分别是:未按规定开展监理工作;安全生产责任人未完全履职;工人违章作业;未按施工设计图要求或施工方案施工;风险评估不到位导致险情征兆出现时没有及时采取有效措施排除险情,合计占比达总次数的54.9%。并且这5个不安全行为的风险等级均为II级,存在较大风险隐患,发生频率和后果严重程度都较高,所以有必要进一步分析研究上述不安全行为,以便后续制定和完善相应安全管理方案和措施。

据统计,16起地铁施工坍塌事故中共计6个机

表4 人群的不安全行为风险等级

Table 4 Risk level of human unsafe actions

序号	不安全行为	频次	P_i	C_{Di}	C_i	R_i	风险等级
UA1	监理单位未能严格履行监理职责,未按规定开展监理工作	9	0.13	42	2.625	0.341	II
UA2	安全生产责任人未完全履职	8	0.116	19	1.188	0.138	II
UA3	工人违章作业	7	0.101	44	2.75	0.278	II
UA4	未按施工设计图要求或施工方案施工	7	0.101	16	1	0.101	II
UA5	风险评估不到位,险情征兆出现,没有及时采取有效措施,排除险情	7	0.101	41	2.563	0.259	II
UA6	施工单位制定的施工方案和施工技术交底针对性不强	6	0.087	16	1	0.087	III
UA7	安全培训内容设置欠缺、未指定合理的人员培训计划	6	0.087	15	0.938	0.082	III
UA8	施工单位安全生产管理人员未消除安全隐患	5	0.072	22	1.375	0.099	III
UA9	设备使用不当	3	0.043	6	0.375	0.016	III
UA10	缺乏安全与应急防护装备,施工单位缺乏有效的应急联动机制	3	0.043	8	0.5	0.022	III
UA11	设备维护、维修不及时	2	0.029	6	0.375	0.011	III
UA12	未对分包单位安全生产工作进行统一协调、管理	2	0.029	7	0.438	0.013	III
UA13	违法分包工程、分包单位违法承包工程	2	0.029	7	0.438	0.013	III
UA14	现场管理人员违章指挥施工	2	0.029	3	0.188	0.005	III

群的不安全状态,见表5。发生总次数为17次,占比较多的分别是:存在复杂地层、降雨、支撑防护未设置或存在严重缺陷,合计占比达70.5%。而存在复杂地层、未设置支撑防护或存在严重缺陷、水文地质条件复杂等3个机群的不安全状态 R_i 数值在

[0.1, 1),为较大风险。基于3.1节的分析,机群的不安全状态的前因都在人群,属于“UA→UC→事故”耦合模式,因此,应重点完善安全管理和安全生产教育培训等管理机制,落实安全生产责任制和加大惩罚力度。

表5 机群的不安全状态风险等级

Table 5 Risk level of human unsafe conditions

序号	机群的不安全状态	频次	P_i	C_{Di}	C_i	R_i	风险等级
UC1	存在复杂地层	6	0.353	22	1.375	0.485	II
UC2	降雨	3	0.176	8	0.5	0.088	III
UC3	未设置支撑防护或存在严重缺陷	3	0.176	27	1.688	0.297	II
UC4	水文地质条件复杂,施工中先后出现渗水、溶洞风险征兆	2	0.118	14	0.875	0.103	II
UC5	喷浆机、冷冻机等机械设备故障	2	0.118	6	0.375	0.044	III
UC6	存在地下管线	1	0.059	3	0.188	0.011	III

3.3 基于耦合风险的地铁施工安全管理方案

道防线”安全管理模型(图 3),制定地铁施工安全管理方案,见表 6。

根据人群-机群风险分析,并基于地铁施工“三

表 6 地铁坍塌事故安全施工管理方案

Table 6 Safety construction management scheme of subway collapse accidents

安全管理对象	第 1 道防线	第 2 道防线	第 3 道防线
地铁坍塌事故	1. 对施工作业工人进行安全教育与技能培训,包括开展应急救援知识、技能培训等。 2. 建立地铁施工安全管理信息平台,实现安全信息公开、共享,提高施工安全风险效率。 3. 加强前期准备工作,地铁工程施工前,进行地铁线路设计时,尽量使线路经过安全的地下环境,避开地质和水文条件差的环境。在勘察阶段,调查好路线周边建筑和公共设施的情况	1. 工程施工期间,实施动态化安全监测,应在重要建筑四周设置监测点,严密观测位移和沉降。当位移和沉降量或变化频率超过规定的报警值时,应立即采取有效的加固措施。 2. 加强动态化安全评价管理,科学合理地选择施工方法,以减少周围环境对地铁实际施工过程的影响。 3. 健全设备设施管理制度、地上地下通讯保障制度等	1. 从施工重、难点出发,将应急预案细化、具体化,编制一系列应急抢险救援预案。 2. 配备应急救援物资,提供物资保障。 3. 当涌水涌砂等坍塌风险征兆无法控制时,应尽快通过逃生通道疏散施工现场人员,同时对坍塌风险上方地上进行围蔽。 4. 若有被困人员,应立即拨打“119”“120”搜救被困人员。 5. 防止次生灾害的发生,封锁事故现场,设立警戒区

首先,通过安全教育等措施,提升人群的安全意识和安全行为能力,从根本上防止事故隐患的出现和事故的发生,这作为安全管理的“第 1 道防线”;其次,安全评价、安全监测等制度或措施的实施能够提前判断施工安全状态,并达到本质安全的目的,这是“第 2 道防线”;最后,应急管理作为防止人群免受伤或减轻伤害的最终措施,这是“第 3 道防线”。当 3 道防线正确实施,每一道防线对于事故的预防作用都能发挥,从而有力地控制地铁施工安全事故的发生。故“三道防线”具有极高的可靠性,不仅能控制坍塌事故的蔓延,还能为坍塌事故人员的逃生节省时间。因此,基于人群-机群耦合风险的地铁施工安全管理模式能为事故的预防、控制和安全管理工作的进行产生极大的促进作用。

4 结 论

1) 系统分析地铁施工事故致因中人群-机群多风险耦合模式,共计 4 种基本模式,具体归纳为 8 条

作用路径。此外,4 种基本模式可两两叠加形成 2 种叠加模式,相应地共有 6 条作用路径。

2) 借助事故致因 24Model 和 GSM 构建地铁施工安全系统管理模型。该模型的第 1 层为目标层,即实现人群的安全、健康、舒适、高效地工作。第 2 层为事故原因与安全防线的匹配层,可分别从微匹配、中匹配和宏匹配 3 个层面进行分析。

3) 统计分析 16 起地铁施工坍塌事故中人群、机群致因因素,得到人群的不安全行为 14 个,机群的不安全状态 6 个,分别给出其人群-机群耦合模式及作用路径,计算其风险等级,并由此提出地铁坍塌事故安全施工管理方案,该方案设有“三道防线”。

4) 虽然分析了人群-机群风险的耦合模式,并建立安全系统管理模型,但是“他系统”原因,如政府监管对事故致因的影响机制还需要进一步研究。此外,对于地铁坍塌事故中风险等级的确定,主要用死亡人数这一指标来衡量其风险的严重程度,未考虑经济损失这一指标,这一点可在后续研究中进一步完善。

参 考 文 献

[1] 黄雄,胡祖祥. 地铁施工事故统计分析与研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(9): 218-224.
 HUANG Xiong, HU Zuxiang. Statistical analysis and research of subway construction accidents[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(9): 218-224.

[2] 侯公羽,刘伟,李乐,等. 多风险因素耦合的地铁施工安全系统脆弱性分析[J]. 土木工程学报, 2022, 55(2): 111-119.
 HOU Gongyu, LIU Wei, LI Le, et al. Vulnerability analysis of the subway construction safety system with coupled multiple risk factors[J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(2): 111-119.

[3] 吴贤国,吴克宝,沈梅芳,等. 基于 N-K 模型的地铁施工安全风险耦合研究[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(4): 96-101.
 WU Xianguo, WU Kebao, SHEN Meifang, et al. Research on coupling of safety risks in metro construction based on N-

- K model[J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(4): 96-101.
- [4] TANG Xiaoxiao, LI Chenlei, LI Lei, et al. Analysis and research on causes of metro accidents based on 24Model[C]. 2021 International Conference on Environmental and Engineering Management, 2021: 151-163.
- [5] 吴超, 黄浪, 贾楠, 等. 广义安全模型构建研究[J]. 科技管理研究, 2018, 38(1): 250-255.
WU Chao, HUANG Lang, JIA Nan, et al. Study on the construction of generalized safety model[J]. Science and Technology Management Research, 2018, 38(1): 250-255.
- [6] 董陇军, 郑如剑, 邓思佳. "L-B" 人机事故模型构建及应用[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(8): 1-8.
DONG Longjun, ZHENG Rujian, DENG Sijia. Construction and application of "L-B" man-machine accident model[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(8): 1-8.
- [7] ZHANG Guohua, WANG Chengtang, JIAO Yuyong, et al. Collapse risk analysis of deep foundation pits in metro stations using a fuzzy Bayesian network and a fuzzy AHP[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 2020: DOI: 10.1155/2020/4214379.
- [8] 王成汤, 王浩, 覃卫民, 等. 基于多态模糊贝叶斯网络的地铁车站深基坑坍塌可能性评价[J]. 岩土力学, 2020, 41(5): 1670-1679, 1689.
WANG Chengtang, WANG Hao, QIN Weimin, et al. Evaluation of collapse possibility of deep foundation pits in metro stations based on multi-state fuzzy Bayesian networks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(5): 1670-1679, 1689.
- [9] QIAN Qihu, LIN Peng. Safety risk management of underground engineering in China: progress, challenges and strategies[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2016, 8(4): 423-442.
- [10] ZHANG Limao, WU Xianguo, QIN Yawei, et al. Towards a fuzzy Bayesian network based approach for safety risk analysis of tunnel-induced pipeline damage[J]. Risk Analysis: an Official Publication of the Society for Risk Analysis, 2016, 36(2): 278-301.
- [11] 柴乃杰, 张梦, 鲍学英, 等. 基于事故树模型的地铁施工地表坍塌事故分析[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(6): 114-119.
CHAI Naijie, ZHANG Meng, BAO Xueying, et al. Analysis of surface collapse accident in subway construction based on fault-tree model[J]. Railway Standard Design, 2018, 62(6): 114-119.
- [12] SUN Jinglai, LIU Baoguo, CHU Zhaofei, et al. Tunnel collapse risk assessment based on multistate fuzzy Bayesian networks[J]. Quality and Reliability Engineering International, 2018, 34(8): 1646-1662.
- [13] 周红波, 高文杰, 蔡来炳, 等. 基于 WBS-RBS 的地铁基坑故障树风险识别与分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2703-2707.
ZHOU Hongbo, GAO Wenjie, CAI Laibing, et al. Risk identification and analysis of subway foundation pit by using fault tree analysis method based on WBS-RBS[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(9): 2703-2707.
- [14] RUTH M, DAVID G, RICHARD M. Application of human factors analysis and classification system (HFACS) to UK rail safety of the line incidents[J]. Accident Analysis and Prevention, 2016, 97: 122-131.
- [15] 杜婷婷, 任翔, 张宇, 等. 基于 STAMP 模型的地铁施工坍塌事故致因分析[J]. 建筑安全, 2021, 36(9): 64-69.
DU Tingting, REN Xiang, ZHANG Ning, et al. Cause analysis of subway construction collapse accident based on STAMP model[J]. Construction Safety, 2021, 36(9): 64-69.
- [16] ANASTACIO P G, GYUCHAN T J, PATRICK W. Four studies, two methods, one accident: an examination of the reliability and validity of Accimap and STAMP for accident analysis[J]. Safety Science, 2019, 113: 310-317.
- [17] 傅贵, 陈奕燃, 许素睿, 等. 事故致因“2-4”模型的内涵解析及第6版的研究[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(1): 12-19.
FU Gui, CHEN Yiran, XU Surui, et al. Detailed explanations of 24Model and development of its 6th version[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(1): 12-19.
- [18] 孔恒, 郭飞, 吕北方, 等. 基于行为安全“2-4”模型的地铁工程安全管理研究[J]. 安全, 2020, 41(12): 59-62.
KONG Heng, GUO Fei, LYU Beifang, et al. Study on safety management of subway project based on behavior safety"2-4" Model[J]. Safety & Security, 2020, 41(12): 59-62.
- [19] FANG Ming, ZHANG Yi, ZHU Mengjue, et al. Cause mechanism of metro collapse accident based on risk coupling[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(4): DOI: 10.3390/IJERPH19042102.
- [20] 王勇, 赖苒苒, 陈秋兰, 等. 我国地铁施工事故统计分析与研究[J]. 工程管理学报, 2018, 32(4): 70-74.
WANG Yong, LAI Jiyu, CHEN Qiulan, et al. A statistical analysis of metro construction accidents in China[J]. Journal of Engineering Management, 2018, 32(4): 70-74.
- [21] 洪敏. 城市轨道交通工程施工项目安全生产精细化管理措施研究[J]. 工程技术研究, 2020, 5(20): 171-172.
- [22] 张景林, 林柏泉. 安全学原理[M]. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2011: 138-139.
- [23] 付净, 聂方超, 荆德吉, 等. 煤矿瓦斯事故不安全动作原因分类特征研究[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2019, 38(6): 501-506.
FU Jing, NIE Fangchao, JING Deji, et al. The classification feature of unsafe acts in coal mine accidents[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2019, 38(6): 501-506.

作者简介: 房明 (1981—), 女, 山东淄博人, 博士, 副教授, 主要从事工程安全与应急管理等方面的研究。E-mail: fangming@gdufe.edu.cn。

